

## НЕОБЫЧНО БОЛЬШОЙ МАГНИТОСФЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ 20 НОЯБРЯ 2003 Г.

А.В. Белов<sup>1</sup>, Л.М. Байсултанова<sup>1</sup>, Е.А. Ерошенко<sup>1</sup>, Е. Мавромичалаки<sup>2</sup>, В.В. Пчелкин<sup>3</sup>, В.Г. Янке<sup>1</sup>

(1) *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН*

(2) *Физический факультет Афинского университета.*

(3) *Полярный геофизический институт.*

По данным мировой сети нейтронных мониторов методом глобальной съемки выделены вариации магнитосферного происхождения 20 ноября 2003. На их основе получено планетарное распределение изменений жесткостей геомагнитного обрезания во время магнитной бури. Данное событие отличает рекордная величина магнитосферных вариаций и их необычное широтное распределение с максимумом при жесткости геомагнитного обрезания 7-8 ГВ. Полученные результаты можно использовать как для коррекции данных нейтронных мониторов на магнитосферные эффекты, так и для уточнения моделей магнитосферных токовых систем, возникающих во время больших магнитных бурь.

### Введение.

Возмущения магнитного поля Земли во время магнитных бурь могут приводить к существенному изменению траекторий заряженных частиц в магнитосфере, вплоть до того, что разрешенные траектории могут стать запрещенными и наоборот. Это имеет два главных следствия для наземных наблюдений: 1) изменяются эффективные пороги обрезания и 2) изменяются эффективные асимптотические направления прихода частиц и, следовательно, приемные коэффициенты для различных станций. Для солнечных космических лучей одинаково важны оба следствия, для галактических космических лучей доминирует эффект, связанный с изменением жесткостей геомагнитного обрезания ( $R_c$ ). Магнитосферный эффект, связанный с изменением жесткостей обрезания, может быть достаточно велик, чтобы существенно исказить вариации космических лучей (КЛ), наблюдаемые на данной станции, или даже полностью изменить их характер. Примером может служить магнитосферный эффект во время магнитной бури 20 ноября 2003 года (рис. 1).

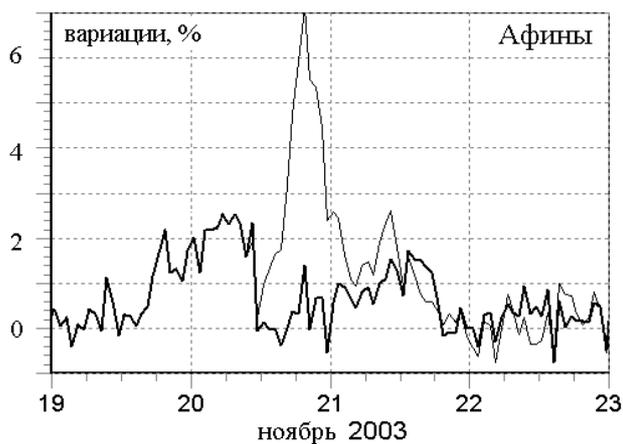


Рис. 1. Неисправленные (тонкая кривая) и исправленные на магнитосферный эффект вариации КЛ.

Есть несколько причин особого интереса к магнитосферным вариациям. Во-первых, эти эффекты интересны с физической точки зрения — с точки зрения образования, развития и распада магнитосферных токовых систем, с точки зрения глобального взаимодействия космического излучения с геомагнитным полем. Во-вторых, магнитосферные эффекты важны с методической точки зрения, поскольку они мешают изучать внеземные вариации космических лучей и, по возможности, должны быть удалены из экспериментальных данных. Большие магнитосферные

эффекты, как правило, наблюдаются одновременно с большими модуляционными эффектами КЛ, поскольку и те, и другие имеют общие причины.

Вариации КЛ, связанные с изменениями  $R_c$  во время больших магнитных бурь, исследовались в ряде работ [1-9]. Их анализ дает независимую возможность для проверки моделей токовых систем во всех фазах развития магнитной бури. В начальной фазе магнитной бури, обычно связанной с токовыми системами в магнитопаузе,  $R_c$  увеличивается по сравнению со спокойным уровнем, тогда как во время главной фазы магнитной бури  $R_c$  значительно уменьшается. При этом различным образом проявляются широтные и долготные зависимости этих эффектов [7]. В данной работе мы исследуем магнитосферные эффекты космических лучей во время исключительно большой магнитной бури 20 ноября 2003 года.

### Данные и метод анализа.

Использовались среднечасовые данные 39 нейтронных мониторов мировой сети станций космических лучей, из которых 15 станций были высокоширотными с  $R_c < 1.2$  ГВ, 22 – среднеширотными и 2 низкоширотными ( $R_c > 10$  ГВ). Задача решалась разработанным нами ранее вариантом [5,7] метода глобальной съемки [10]. Решение системы спектрографических уравнений, описывающих наблюдаемые на каждой станции вариации КЛ, позволяет выделить изотропные и анизотропные вариации. Остаточную невязку можно отнести к магнитосферным вариациям.

### Результаты анализа и их обсуждение.

Несмотря на исключительно большую магнитную бурю, Форбуш-понижение было умеренным по величине. Вариации плотности КЛ имели сравнительно жесткий энергетический спектр. Магнитосферный эффект оказался наибольшим на относительно низкоширотных станциях, а не на среднеширотных, как это чаще всего наблюдается. Он был столь значителен по амплитуде, что Форбуш-понижение на некоторых станциях полностью маскируется магнитосферным эффектом. Это видно из рис. 1, на котором приведены неисправленные и исправленные на магнитосферные

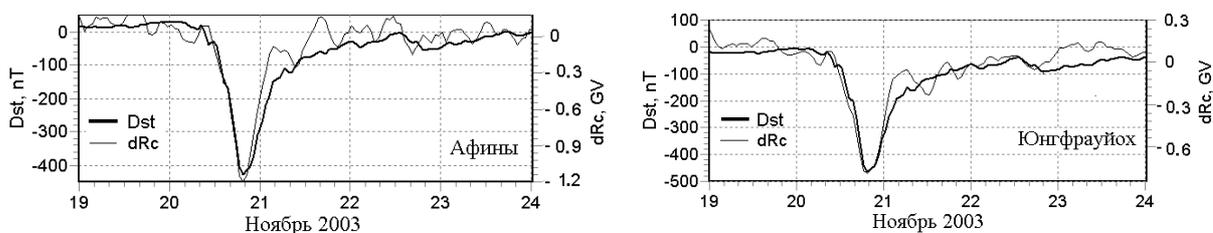


Рис. 2. Сравнение найденных изменений жесткостей геомагнитного обрезания  $dR_c$  и  $Dst$ - индекса для двух станций во время магнитной бури 20 ноября 2003 года.

эффекты вариации КЛ для станции Афины. Результатом проведенного спектрографического анализа изменение  $R_c$  для различных моментов времени для каждой станции. Для станций Афины и Юнгфрауйох результат представлен на рис 2, на котором проводится также сравнение поведения найденных  $dR_c$  и  $Dst$ . Это не аппроксимация, а визуальное совмещение масштабов. Видна очень хорошая корреляция для всего представленного периода. Обычно станция Юнгфрауйох в 2 раза более чувствительна к геомагнитным эффектам, чем станция Афины, в данном же случае на станции Афины геомагнитный эффект вдвое больше. Как будет видно ниже, это связано с особенностью бури 20 ноября 2003 года, а именно с пространственным расположением токовой системы. На рис.3 этот же результат представлен в виде корреляционной зависимости. Видно, что при самых больших геомагнитных возмущениях ( $Dst > 50$  нТл) наблюдается приблизительно линейная связь  $dR_c$  и  $Dst$ .

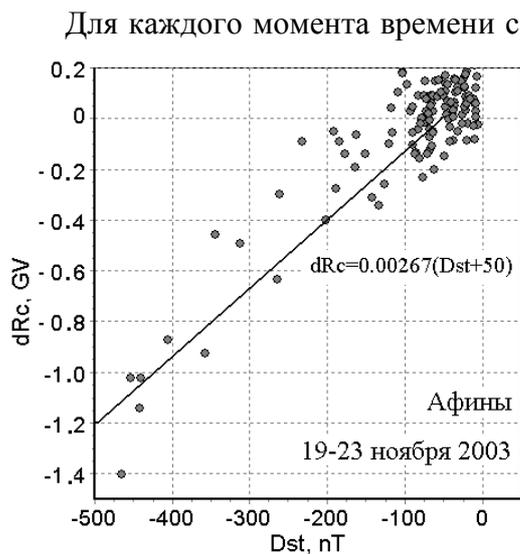


Рис. 3. Корреляция между изменением геомагнитного порога  $dR_c$  и  $Dst$ .

На рис.4 сравниваются экспериментальные и расчетные значения изменений  $R_c$  для момента максимума эффекта в 19.30 UT. Расчет проводился с использованием последней "буревой" модели магнитосферного магнитного поля [12] по методике, описанной в [13]. Расчет траекторий выполнялся от главного конуса к штёрмеровскому, с суммированием всех разрешённых интервалов (т.е. для плоского спектра КЛ). Сетка расчёта - 0.002 ГВ. Длительность расчёта траекторий квазизахваченных частиц выбиралась из условия близости к асимптотическому значению. Тестирование проводилось в достаточно спокойный период для 6:30 UT 20 ноября. Для этой точки классический пакет T89 и новый T01s дают очень близкие значения. Относительно этого момента и определялись изменения ЖГО. Экспериментальные точки несколько смещены по  $R_c$ , поскольку они определялись для модели главного магнитного поля IGRF-1990. Видно, что при жесткости  $>6$  ГВ наблюдается очень хорошее согласие экспериментальных и расчетных значений, причем без какой-либо нормировки. Расхождение при меньших жесткостях может быть обусловлено неадекватностью модели для таких больших возмущений в магнитосфере. В защиту применяемой методики, заметим, что, выполняя такой же анализ для других магнитных бурь [7] мы получили классический широтный ход изменений  $R_c$  с максимумом в области 3-4 ГВ.

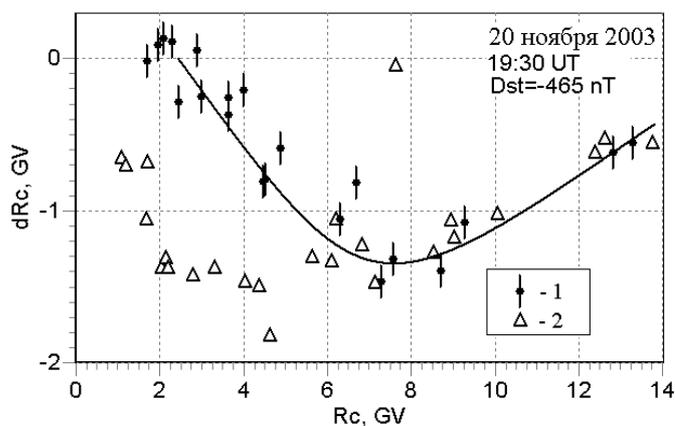


Рис. 4. Широтная зависимость изменений  $R_c$  в максимуме развития магнитной бури.

1 - найдено экспериментально,  
2 - вычислено на основе модели [12].

Тестирование проводилось в достаточно спокойный период для 6:30 UT 20 ноября. Для этой точки классический пакет T89 и новый T01s дают очень близкие значения. Относительно этого момента и определялись изменения ЖГО. Экспериментальные точки несколько смещены по  $R_c$ , поскольку они определялись для модели главного магнитного поля IGRF-1990. Видно, что при жесткости  $>6$  ГВ наблюдается очень хорошее согласие экспериментальных и расчетных значений, причем без какой-либо нормировки. Расхождение при меньших жесткостях может быть обусловлено неадекватностью модели для таких больших возмущений в магнитосфере. В защиту применяемой методики, заметим, что, выполняя такой же анализ для других магнитных бурь [7] мы получили классический широтный ход изменений  $R_c$  с максимумом в области 3-4 ГВ.

Обращает внимание "выпадение" станции Мехико из общего хода расчетных значений изменений  $R_s$ . Для этой станции ширина пенумбры резко уменьшается. В то время как значение главного конуса понижается очень существенно, значение штермеровского конуса (и, соответственно, эффективная жёсткость) сильно приближается к главному. Такая ситуация наблюдается только для таких больших бурь. Кстати, такой эффект (скачкообразное изменение ширины пенумбры) наблюдается и на других станциях, хотя и не в такой степени.

### Основные выводы.

1) Во время главной фазы магнитной бури 20 ноября 2003 года наблюдался исключительно большой магнитосферный эффект. Особенность данного события в том, что максимальный магнитосферный эффект наблюдается не на среднеширотных (3-4 ГВ), как обычно, а на низкоширотных станциях (7-8 ГВ) космических лучей.

2) Проведенный расчет значений изменений  $R_s$  для последней "буревой" модели магнитосферного магнитного поля [12] показал, что для жесткостей  $> 6$  ГВ наблюдается очень хорошее согласие между экспериментальными и расчетными данными. Расхождение при меньших жесткостях может быть обусловлено неадекватностью модели для самых больших магнитосферных возмущений.

3) Дальнейшее развитие и расширенный вариант данной работы с анализом других событий можно найти по адресу <http://cr0.izmiran.rssi.ru/GeoMagCR/main.htm>.

Эта работа и работа российской сети станций космических лучей частично поддержана РФФИ (гранты 04-02-16763, 03-07-90389), ГК 10002-251/П-06/048-051/200404-046, американо-канадские станции фондом NSF USA (грант ATM-0000315). Авторы благодарны сотрудникам всех станций, на данных которых базируется наша работа: Alma-Ata, Apatity, Baksan, Barendsburg, Calgary, Cape Schmidt, Climax и Haleakala (Университет Чикаго, NSF гранты ATM-9613963, ATM-942-0790), Erevan, ESOI, Fort Smith, Hermanus, Inuvik, Irkutsk, Jungfrauoch, Kiel, Larc, Lomnický štít, McMurdo, Magadan, Mexico, Moscow, Nain, Norilsk, Novosibirsk, Newark, Oulu, Potchefstroom, Peawanuck, Tixie bay, Rome (UNIroma-Tre and IFSI-CNR Collaboration), Sanae, South Pole, Thule, Tsumeb, Yakutsk, Beijing, Tibet, Kergelen, Terra Adelia, Mawson и Kingston.

### Список литературы

1. *Debrunner H., Flueckiger E., Mandach H., Arens M.* // Planetary and Space Science. 1979. V. 27. P. 577.
2. *Flueckiger E. O., Smart D. F., Shea M.A.* // Proc. 17th ICRC. Paris. 1981. V.4. p. 244.
3. *Flueckiger E., Smart D., Shea M.* // Proc. 20-th ICRC. Moscow. 1987. V. 4. 216.
4. *Dvornicov V., Sdobnov V., Sergeev A.* // Proc. 20-th ICRC. Moscow. 1987. v. 4, 220.
5. *Baisultanova L., Belov A., Dorman L., Yanke V.* // Proc. 20-th ICRC. 1987. V. 4. 231.
6. *Дворников В.М., Сдобнов В.Е.* // Изв. РАН. Сер. физ. 1988. Т. 55(10). p. 1991.
7. *Baisultanova L., Belov A., Yanke V.* // 1995. Proc 24-th ICRC. Roma. v. 4. 1090.
8. *Сдобнов В.Е., Дворников В.М., Луковникова А.А., Осипова Н.А.* // Солнечно-земная физика, 2002. вып. 2. p. 230.
9. *Dvornikov V., Sdobnov V.* // Intern. JGA. 2002. V. 3. No. 3. P. 1-11. February 2002.
10. *Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Чирков Н.Р. и др.* // Геомагн. и Аэрон.. 1966. 6. 991.
11. *Treiman S.B.* // Phys. Rev.. 1953. V. 89(1). P. 130.
12. *Tsyganenko N.A., Singer H.J., Kasper J.C.* // J. Geophys. Res.. 2003. V. 108(A5). 1209. doi:10.1029/2002JA009808.
13. *Пчелкин В.В., Вашенюк Э.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2001. Т. 65. № 3. С. 416.